第 38 卷第 4 期 2018 年 2 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.38,No.4 Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201610102037

刘文全,卢芳,徐兴永,曹建荣,付腾飞,陈广泉,苏乔,吕文哲.废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征.生态学报,2018,38(4):1311-1319.

Liu W Q, Lu F, Xu X Y, Cao J R, Fu T F, Chen G Q, Su Q, Lü W Z.Spatial variation of soil salinity and organic matter under reclamation in an abandoned salt pan.Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1311-1319.

废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征

刘文全[1,2],卢 芳[2,3,*],徐兴永[1,2],曹建荣[4],付腾飞[1,2],陈广泉[1,2],苏 乔[1,2],吕文哲[1,2]

1 国家海洋局第一海洋研究所,海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室,青岛 266061

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室,青岛 266061

3 中国海洋大学环境科学与工程学院,山东省海洋环境地质工程重点实验室,青岛 266100

4 聊城大学,环境与规划学院, 聊城 252059

摘要:针对目前莱州湾南岸废弃盐田复垦过程中存在的土壤盐碱、瘠薄等障碍问题,以该区两个典型复垦地块为研究对象,综合运用经典统计学和地质统计学的克立格法,研究不同复垦年限下各层土壤盐分和表层土壤有机质的空间变异性,对二者进行相关性分析,并绘制了各土层盐分和表层土壤有机质含量的空间分布图。结果表明:两个区域各层土壤含盐量较高,均超过 1g/kg;受复垦年限、土地平整水平和施肥等人为复垦措施影响,二区土壤含盐量明显低于一区;两个区域土壤有机质含量普遍较低,其中一区为 4.37g/kg,二区为 3.66g/kg;两个区域各层土壤含盐量和表层土壤有机质变异系数在 32.79%—83.83%之间,在水平方向上呈中等变异强度;相关性分析结果表明各层土壤含盐量与有机质含量均呈极显著负相关;各土层土壤含盐量和有机质含量的块基比均小于 25%,表明二者具有强烈的空间相关性;空间自相关距离最小为 440m,超过采样间距(最小为 160m),表明采样间距设置合理;Kriging 插值结果表明两个区域土壤含盐量和有机质含量呈条带状分布;一区土壤含盐量以中部为高值区逐渐向南北部降低,二区土壤含盐量则以东南部最低,逐渐向西北部高值区过渡;一区土壤有机质含量表现为中部低南北部较高,二区则为东南部最高,中北部含量较低。研究结果为后期高含盐量的水盐运移模拟研究提供初步论证,也为盐田复垦区盐渍土的合理分区,改良利用和科学管理提供了技术支撑。

关键词:废弃盐田;复垦;盐分;有机质;Kriging 插值

Spatial variation of soil salinity and organic matter under reclamation in an abandoned salt pan

LIU Wenquan[1,2], LU Fang[2,3,*], XU Xingyong[1,2], CAO Jianrong[4], FU Tengfei[1,2], CHEN Guangquan[1,2], SU Qiao[1,2], LÜ Wenzhe[1,2]

1 *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*

2 *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China*

3 *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

4 *College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China*

基金项目:国家基金委-山东省联合基金项目(U1606401);山东省教育厅科技发展计划项目(J15LH09);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2015T01);海洋公益性行业科研专项经费项目(2015418012-1)

收稿日期:2016-10-10; **网络出版日期**:2017-11-12

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: fang_lu1130@163.com

Abstract: Soil salinization and low fertility are problems associated with the abandoned salt pan in the southern coastal area of Laizhou Bay. Therefore, two typical reclamation areas were the research focus of the present study, which used classical statistics and geostatistical Kriging interpolation methods to evaluate the spatial variation of soil salinity and organic matter of typical parcels at different reclamation years. The correlation between soil salinity and organic matter was analyzed, and the spatial distribution maps of soil salinity in the different soil layers and organic matter contents of the surface layer were also evaluated. The results indicated there was high soil salinity in both reclamation areas, and the levels of both areas were higher than 1g/kg. Due to the effect of reclamation years, land leveling, irrigation, and tillage methods, the soil salinity in area two was evidently lower than that in area one. Low organic matter content was also found in the two areas, which was 4.37 and 3.66g/kg in areas one and two, respectively. Both the soil salinity and organic matter showed moderate spatial variability in the horizontal direction, and the variation coefficient was in the range of 32.79%—83.83%. The correlation analysis results indicated a significant negative correlation between the soil salinity and organic matter in all soil layers; the nugget/sill ratio was less than 25% indicating a strong spatial correlation between the two parameters. The minimum autocorrelation distance was 440m, which was longer than the sampling intervals (minimum value was 160m), indicating that the sampling intervals were rational. The spatial distribution maps of the soil salinity and organic matter content obtained using the Kriging interpolation showed an apparent strip style. In area one, the soil salinity gradually reduced from the central region to the northern and southern regions. In area two, the soil salinity had the lowest value in the southeast and gradually shifted to the high-value area in the northwest. The organic matter content was lower in the central area than that in the southern and northern area in area one. However, the highest organic matter content was observed in the southeast region, whereas lower values were found in the central and northern regions in area two. The research results could provide a theoretical basis and technical support for the rational partitioning, amelioration, and utilization, as well as scientific management of saline soils in salt pan reclamation areas.

Key Words: abandoned salt pan; reclamation; salinity; organic matter; Kriging interpolation

我国东部沿海地区分布着大面积的盐田区,据相关文献统计,总数约为 33.7×10^4 hm^2[1],其中莱州湾南岸地区的盐田面积就达到 4.2×10^4 hm^2,原盐产量占全国的四分之一[2]。莱州湾南岸地处渤海之滨,历史上发生过 3 次较大的海侵事件,地下潜水层赋存高矿化度卤水[3-5]。从 20 世纪 70 年代开始,当地开展了大规模地下卤水资源开采活动,卤水晒盐成为当地重要的经济发展支柱产业。近年来,由于区域浅层地下卤水资源逐渐枯竭,而深层卤水开采又受成本过高限制,加之受原盐市场价格等因素的影响,很多盐田变成了废弃地。在此背景下部分盐场利用国家相关政策,对废弃盐田进行了复垦。虽然对盐田复垦土地开展了一系列农业和工程相结合的整治措施,但受常年晒盐影响,土壤中仍含有大量的可溶性盐分,而土壤养分含量极低。在一定盐浓度范围内,作物的相对产量与饱和土壤浸出液的电导率呈负相关[6]。高含盐量影响着作物生长发育、土壤养分和土壤微生物,并最终导致土壤侵蚀和荒漠化[7-8]。因此,对盐田复垦区肥盐动态的研究为区域盐渍土分区改良、合理利用和科学管理提供理论基础。

20 世纪 90 年代以来,地统计学和 Kriging 估值方法被逐渐引入到土壤特性的空间变异研究中。研究表明,地统计学和 GIS 技术相结合的方法是研究滨海地区土壤特性空间变异或其他农田特征变异定量化的有效方法[9-11]。Panagopoulos 等利用地统计学和 GIS 技术对地中海地区土壤盐分的空间变异性进行了研究,并利用克里格方法绘制了区域土壤盐分的空间分布情况,为莴苣产量提高和区域精准农业生产提供理论支持[12]。杨劲松等借助于地统计学的指示克里格法对黄河三角洲地区 200hm^2 典型地块的土壤盐分进行了空间变异性的分析,给出了不同时段土壤盐分满足一定标准的条件概率图[13]。He 等基于地统计学方法对崇明岛不同植被群落一年内土壤盐分的变化趋势进行了研究,揭示了不同植被群落对土壤盐分的空间分布影响显著[11]。Yao 等在磁感式大地电导率仪 EM38 的支持下,利用地统计学分析了浙江滨海地区土壤盐分与作物生物量的

响应关系,结果表明根系土壤盐分的升高降低了作物生物量[14]。Liu 等研究了黄河三角洲不同层次土壤盐分的空间分布特征[15]。与众多滨海土壤盐分空间变异研究相比,盐田复垦区土壤盐分空间变异性研究相对薄弱,相关研究成果鲜有报道。废弃盐田的土壤盐分一般高达 1%—1.5%以上[16],加之排水不畅,土壤淋盐洗盐困难,导致作物产量低下。莱州湾南岸废弃盐田分区域进行了数年的复垦,目前复垦效果较多的是从棉花产量角度进行横向对比,为了从更深层次探索对比复垦效果,进而提出更加科学合理的复垦措施,本文针对该区农业生产过程的主要影响因子,以盐田复垦区典型地块作为研究对象,基于地统计学和 GIS 技术,选取对作物生长发育过程有重要影响的土壤盐分和有机质两个指标进行空间变异性研究,绘制了不同复垦年限下不同深度土壤盐分和表土层有机质含量的空间分布图,并对二者的相互关系进行了分析,为合理利用、改良和科学管理盐田复垦区土地提供一定的理论基础和技术支持。

1　研究区概况

研究区位于莱州湾南岸的昌邑市柳疃镇北部盐田复垦区,具体地理位置如图 1 所示。图中一区复垦年限为 4 年,面积为 40hm^2,长 1000m,宽 400m;二区复垦年限为 6 年,面积 24hm^2,长 600m,宽 400m。利用排盐沟进行小区划分,每个小区宽 40m,长度 300m 左右。两个区复垦前均为卤水(浓度平均为 5—10°Be′)晒盐区,回填后土壤盐分含量仍超过 25g/kg。复垦第一年统一从柳疃镇引地下微咸水(Cl^-:887mg/L)进行一次大水漫灌压盐处理,第二年开始种植耐盐作物棉等,但产量极低。随着种植年限的增加,棉花产量开始提高,目前达到 2.25t/hm^{2}左右,仍属于低产田。该区属暖温带半湿润东亚季风区大陆性气候,四季明显,春季风大干燥,易旱,夏季高温多雨,间有旱灾,秋季温和凉爽,季末易干旱,冬季干冷,雨雪稀少;年平均为 11.9℃,年平均降水量 660.1mm,主要集中在夏季(6、7、8 月)占 64.5%,年平均蒸发量 1859.4mm,平均蒸降比为 3.0 左右;土壤类型主要为盐化潮土,研究区范围内广布盐田,部分区域种植棉花、花生和玉米等农作物。由于该区地下埋藏有高矿化度卤水,加之缺乏蓄水工程,雨季不能调蓄,非雨季淡水资源紧缺,农田灌溉主要通过地下管网从南部柳疃镇取水,利用膜下滴灌来满足作物生长需求,每次的灌溉量为 450—600m^3/hm^2,土壤含盐量呈现季节性的“积盐-淋溶”变化状态。

2　材料与方法

2.1　样品采集

在研究区布设土壤采样点,采用网格法进行均匀化采样,一区样点间距为 180m 左右,设置取样剖面 48 个;二区样点间距为 160m 左右,设置取样剖面 32 个;每个采样点剖面按 0—30、30—60、60—100cm 进行分层采样,共采集土壤样品 240 个,各采样点的坐标采用差分 GPS 进行定位,采样日期为 2016 年 4 月上旬,处于棉花播种前期。

2.2　样品处理与分析

现场采集的土壤样品用封口袋密封并做好标记,带回实验室内进行自然风干,磨碎、过 2mm 筛后备用。所有的土样均制备 1:5 土水比浸提液,室内利用 YSI EC300 仪器测定其电导率 EC。土壤含盐量采用重量法测定,表层土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,具体测量方法参考《土壤农业化学分析方法》[17],所有室内测试工作均在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室中完成,保障样品测试数据的精确性。众多文献表明[18,19],土壤含盐量与浸提液电导率之间存在正相关关系,本文从采集的土壤样品中随机选取 48 个样品测定土壤含盐量,进而可以得出研究区土壤含盐量与浸提液电导率之间的换算关系:

$$S_t = 0.056EC_{1:5} - 0.55 \ (r^2 = 0.95,\ P<0.05,\ n = 48)$$

式中,S_t为土壤含盐量(g/kg);EC 为 1:5 土水比土壤浸提液电导率(mS/m)。对于未测定含盐量的土样,可由浸提液电导率 EC 经上式换算得到。

2.3　地统计学分析方法

本研究采用地统计学方法进行土壤含盐量和有机质含量的空间变异性分析。地统计学是以区域化变量

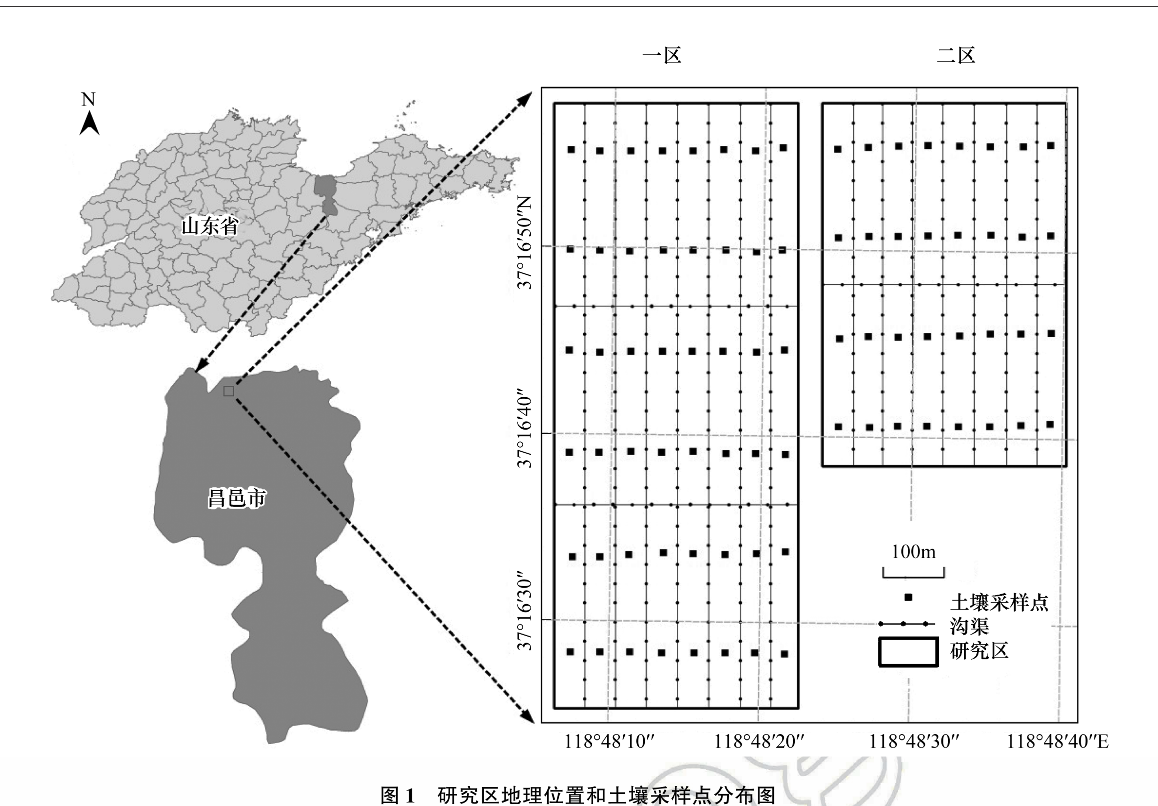


图 1 研究区地理位置和土壤采样点分布图

Fig.1 Geographical location of the study area and distribution map of soil sampling

理论为基础,以变异函数为主要工具,研究在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关和依赖性的自然现象的科学,其理论模型公式为[20-21]:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{1}$$

式中,$\gamma(h)$ 为变异函数;h 为步长,表示样点空间间隔距离;$N(h)$ 为抽样间隔为 h 时的点对数;$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是变量 Z 在空间位置 x_i 和 x_i+h 上的取值。

2.4 数据处理

研究区土壤盐分和有机质数据计算分析均在 SPSS 19.0 软件中进行,半方差函数计算在 GS$^+$ 9.0 软件中进行,对所有参与计算数据进行预处理和对数变换使其符合正态分布,避免出现比例效应[22]。采用 ArcGIS 9.3软件中地统计分析模块进行土壤含盐量和有机质含量的 Kriging 插值,进而绘制盐田复垦区土壤含盐量和有机质的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 土壤含盐量和有机质分布特征

研究区不同层次土壤盐分和有机质实测值的统计特征值如表 1 所示。从表 1 中可以看出,不同区域土壤含盐量和有机质含量差异性较大。一区和二区各层土壤含盐量的变幅最大分别达到 16.4g/kg 和 15.48g/kg。随着土壤深度的增加,土壤含盐量的变幅也在逐渐加大。两个区域各层土壤含盐量均值较高,且随着深度的增加,均值变大。两个区域表层土壤有机质含量均较低,均值分别为 4.37g/kg 和 3.66g/kg。变异系数的大小反映数据的离散程度,变异系数<10%为弱变异性,变异系数 10%—100%为中等变异性,变异系数>100%为强变异性[23]。从表 1 来看,各层土壤含盐量和表层土壤有机质含量变异系数的变化范围在 32.79%—83.83%之间,两个区域土壤含盐量和有机质含量在水平方向上均呈中等变异强度。一区各层土壤含盐量和有机质的变异系数明显高于二区,说明二区各层的土壤盐分和有机质分布更加均匀。

表 1　不同层次土壤盐分、有机质的统计特征

Table 1　Statistical characteristics for soil salinity and soil organic matter in different layers

区域 Area	项目 Item	分布类型 Distribution pattern	极小值 Min./(g/kg)	极大值 Max./(g/kg)	均值 Mean/(g/kg)	标准差 S.D.	变异系数 CV/%	K-S 检验系数 K-S Inspection coefficient
一	S_{t0-30}	LN	0.23	9.27	1.63	1.23	75.46	0.72
	S_{t30-60}	LN	0.59	13.18	3.77	3.16	83.82	0.97
	$S_{t60-100}$	LN	0.72	17.12	5.31	4.38	82.48	0.18
	OM_{0-30}	LN	1.04	9.80	4.37	1.83	41.88	0.98
二	S_{t0-30}	LN	0.16	4.95	1.07	0.66	61.68	0.47
	S_{t30-60}	LN	0.41	8.35	2.28	1.08	47.37	0.46
	$S_{t60-100}$	LN	0.06	15.54	3.87	1.94	50.13	0.21
	OM_{0-30}	LN	1.54	5.73	3.66	1.20	32.79	0.93

注:S_{t0-30}:0—30cm 土壤含盐量,S_{t30-60}:30—60cm 土壤含盐量,$S_{t60-100}$:60—100cm 土壤含盐量,OM_{0-30}:0—30cm 土壤有机质含量(以下同),LN:对数正态分布(Logarithmic normal distribution)

3.2　土壤含盐量和有机质的相关性分析

本研究分别对两个研究区不同层次土壤盐分和有机质的相关性进行了分析,结果见表 2。一区和二区各层土壤含盐量与有机质含量均呈极显著负相关。两个区域 0—30cm 土壤含盐量和有机质的负相关系数明显高于 30—60、60—100cm 两层,其他层次土壤含盐量与有机质的负相关系数变化不大。从两个区域各层土壤含盐量的相关性可以看出,各层土壤含盐量之间均呈现极显著正相关关系,说明土壤内部的盐分在纵向上存在正向关联,每一层盐分的变化都将影响其他层位的盐分含量。

表 2　各层土壤盐分和有机质的相关性矩阵

Table 2　Correlation matrix of soil salinity and soil organic matter in different layers

	一区 Area one					二区 Area two			
	OM_{0-30}	S_{t0-30}	S_{t30-60}	$S_{t60-100}$		OM_{0-30}	S_{t0-30}	S_{t30-60}	$S_{t60-100}$
OM_{0-30}	1				OM_{0-30}	1			
S_{t0-30}	-0.59**	1			S_{t0-30}	-0.60**	1		
S_{t30-60}	-0.39**	0.74**	1		S_{t30-60}	-0.48**	0.68**	1	
$S_{t60-100}$	-0.38**	0.68**	0.91**	1	$S_{t60-100}$	-0.49**	0.54**	0.78**	1

** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关

3.3　土壤含盐量和有机质的空间变异性分析

经典统计学方法仅在一定程度上反映研究区土壤盐分和有机质的样本总体及变异状况,不能定量地刻画土壤盐分和有机质的随机性和结构性、独立性和相关性,需进一步采用地统计学方法对其空间变异结构进行分析和探讨[24]。本文对两个区域不同层次土壤盐分和有机质的空间变异性进行了分析,用高斯模型、指数模型和球状模型等进行理论模型拟合,得到模型的相关参数值(表 3),最终选取决定系数 R^2接近于 1 和残差平方和(RSS)较小的模型来模拟土壤含盐量和有机质含量的空间分布状况。

表 3 中,Co 为块金值,$Co+C$ 为基台值,$Co/(Co+C)$ 为块基比可以用来表征土壤特性空间相关性的程度。如果 $Co/(Co+C)$ 小于 25%,表示二者具有强烈的空间相关性;在 25%—75%之间,空间相关性中等;大于 75%,空间相关性很弱;若比值接近于 1,说明在整个尺度上具有恒定的变异[25]。从表 3 中可以看出,两个区域表层土壤含盐量空间分布均符合高斯模型,其他各层符合球状模型。一区土壤有机质含量空间分布符合球状模型,二区则符合高斯模型。两个区域不同层次土壤含盐量和表土层有机质含量的块基比均小于 25%,说明具有强烈的空间相关性。从空间自相关距离来看,两个区域土壤含盐量和有机质含量的变化范围在 0.44—1.33km 之间,远超过实际土壤样品的取样间距 0.16—0.18km,说明取样间距比较合理,能反映出两个区域土壤含盐量和有机质含量的空间自相关关系。分维数 D 表示半方差函数 $\gamma(h)$ 曲线的曲率大小,D 值越大,由

空间自相关部分引起的空间变异性越高。土壤含盐量和有机质含量的分维数变化范围在 1.776—1.993 之间，D 值均较高，说明空间自相关部分引起的空间变异性高。

表 3 各层土壤盐分和有机质的半方差理论模型及其参数

Table 3 Types of semi-variance model and their parameters for soil salinity, soil organic matter in different layers

区域 Area	项目 Item	理论模型 Theoretical model	Co	$Co+C$	$Co/(Co+C)/\%$	变程 Range/km	R^2	RSS	D
一	S_{t0-30}	高斯模型	0.35	1.49	23.49	1.33	0.91	0.04	1.776
	S_{t30-60}	球状模型	0.21	0.94	22.34	0.44	0.71	0.05	1.982
	$S_{t60-100}$	球状模型	0.17	0.72	23.61	0.67	0.82	0.139	1.993
	OM_{0-30}	球状模型	0.12	0.98	12.24	0.50	0.89	0.018	1.942
二	S_{t0-30}	高斯模型	0.19	0.87	21.84	0.81	0.83	0.072	1.814
	S_{t30-60}	球状模型	0.23	1.37	16.79	0.52	0.93	0.051	1.947
	$S_{t60-100}$	球状模型	0.33	1.42	23.24	0.79	0.90	0.036	1.926
	OM_{0-30}	高斯模型	0.11	0.85	12.94	0.73	0.79	0.089	1.779

R^2：决定系数，coefficient of determination；RSS：残差平方和，Residual sums of squares；D：分维数，Fractal

3.4 土壤含盐量和有机质的 Kriging 空间插值分析

为了更加直观准确的反映盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间分布状况，本研究采用地统计学的克里格（Kriging）法对两个区域不同层次土壤含盐量和有机质含量进行空间内插。克里格插值的实质是利用已知区域化变量的原始数据，借助于半方差函数对未知样点进行线性无偏、最优估计的一种地统计学方法。本研究基于上文确定的理论模型，利用 ArcGIS 9.3 软件的地统计分析模块绘制完成两个区域不同层次土壤含盐量和有机质含量的空间分布图（图 2、图 3）。

从图 2 可以看出一区各层土壤含盐量的空间分布情况：总体上，各土层土壤含盐量的空间分布均呈现出条带状和斑块状格局，土壤含盐量均是中部高，南北低；土壤含盐量的空间分异大致上均呈现出由中部向南北部逐渐减小的规律。对于一区的表层土壤有机质，其空间分布于盐分相反，中部低而南北部较高，特别是西北部和东南部有机质含量最高。

从图 3 可以看出，二区各层土壤含盐量的空间分布是中部、北部，特别是西北部含量较高，而东南部含量较低。二区表层土壤有机质含量的空间分布状况表现为东南部最高，中北部含量较低。从整个研究区来看，各层土壤含盐量和有机质含量的空间分布状况很好的验证了二者的相关性分析结果，一区各层土壤含盐量的空间分布具有相似性，中部区域盐分含量高；二区各层土壤含盐量的空间分布同样具有相似性，中部和西北部盐分含量高；两个区域有机质均以中部区域较低；从两个区域土壤盐分含量分布来看，一区各层土壤高盐分区域明显多于二区。

4 讨论

有研究表明，当高含盐量的盐田回填区底层土壤处于极限蒸发深度之内时，溶解的盐分在蒸发作用下直接形成地表积盐；当其处于极限蒸发深度之外时，溶解的盐分虽然无法直接形成地表积盐，但会使上层土壤的含盐量增加[26]。从本文的研究结果看，莱州湾盐田复垦区正处于底层盐分高，表土层盐分相对低的状态下，研究区虽然进行了多年的复垦，但土壤中总体盐分含量仍处于较高水平，同时由于当地淡水资源缺乏，有限的滴灌水量仅能维持作物生长需求，更深层的土壤盐分无法得到淋洗，因此随着深度增加，盐分含量越高。两个区域土壤含盐量均值对比分析结果表明，一区各层土壤盐分含量明显高于二区，这是由于二区复垦年限比一区多两年，人为复垦措施降低了土壤盐分含量，这与其他学者对不同复垦年限下土壤属性变化规律的研究结果相似[27-28]。土壤有机质是土壤固相的重要组分之一，对土壤水分、养分、土壤结构耕性起到重要的协调作用[29]。两个区域有机质含量极低，按照全国土壤养分分级标准（表 4），属于第五级，分析其原因主要是由于

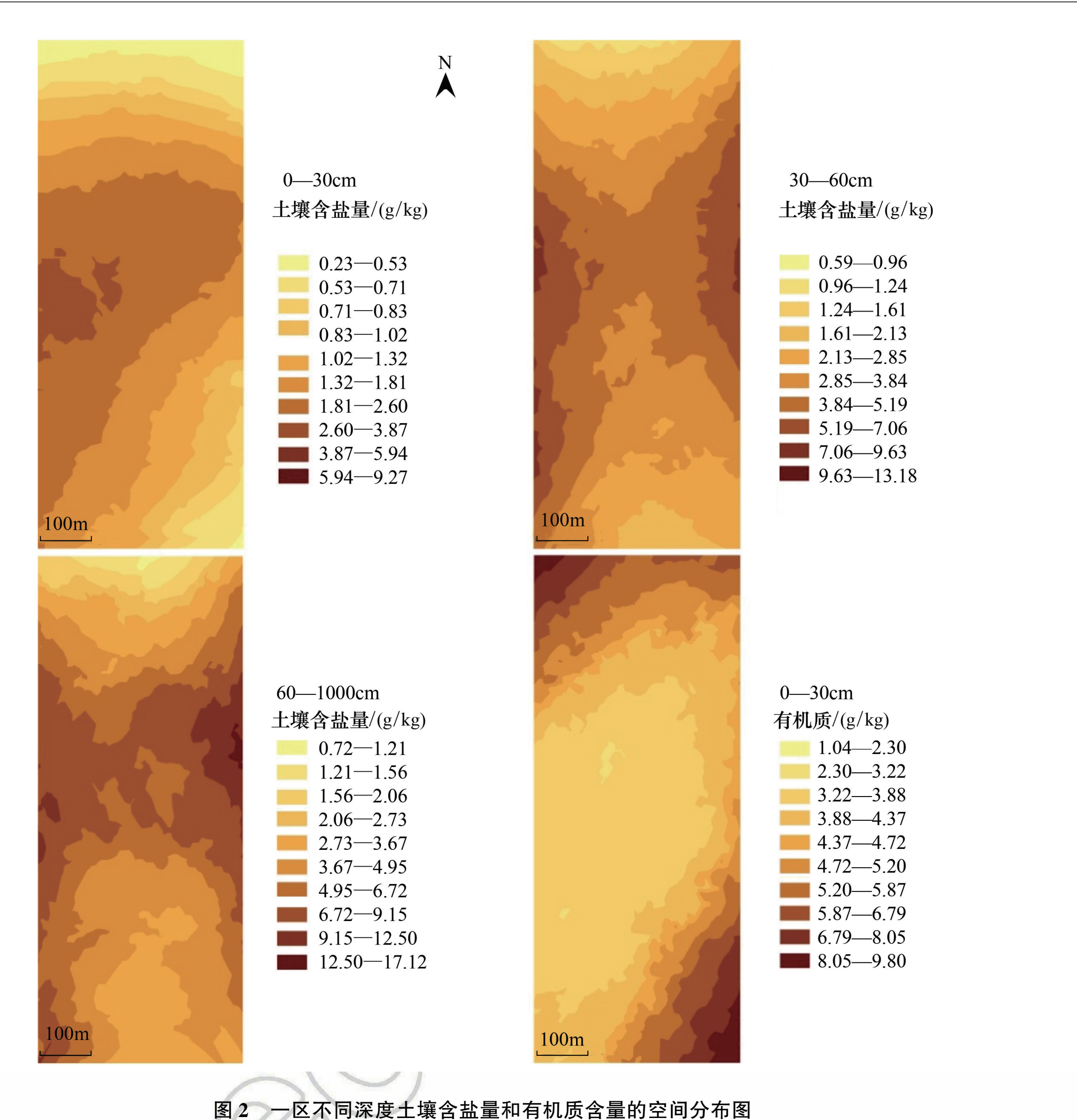


图 2　一区不同深度土壤含盐量和有机质含量的空间分布图

Fig.2　Spatial distribution of soil salinity and soil organic matter in different layers in area one

滨海地区土壤本身较为贫瘠,加之复垦过程中使用的肥料较少造成(复合肥 525kg/hm^2,有机肥 600kg/hm^2)。

表 4　全国土壤养分分级标准

Table 4　The standards of soil nutrient in China

等级 Classification	有机质含量/% Organic content	等级 Classification	有机质含量/% Organic content
1 级(丰富)Level 1 (rich)	>4.0	4 级(较缺)Level 4 (lack)	1.01—2.0
2 级(较丰富)Level 2 (relative rich)	3.01—4.0	5 级(缺)Level 5 (poor)	<1.0
3 级(中等)Level 3 (moderate)	2.01—3.0		

土壤理化性质的空间分布受随机性因素(如灌溉、耕作措施和土壤改良等各种人为活动)和结构性因素(如气候、地形、土壤类型等)共同影响[11,30]。在本研究中,土壤含盐量和表土层有机质含量的块基比均小于25%,具有强烈的空间相关性,说明二者的空间分布主要受结构性因素影响,而随机性因素影响较弱,分析其原因主要是本区由废弃盐田复垦而来,在自然状态下盐分含量极高,虽然经过数年的人为复垦措施,但底层土壤盐分含量仍然处于较高水平,土体水盐运动强烈,自然属性的影响力要高于人为复垦措施的影响。

Kriging 插值具有平滑数据的作用,从而减少了土壤理化性质空间分布的突然变化[24]。一区各层土壤盐分的空间分布结果表明,中部高南北部低,分析其主要原因是由于一区中部地势略低于南北两端,在进行滴管

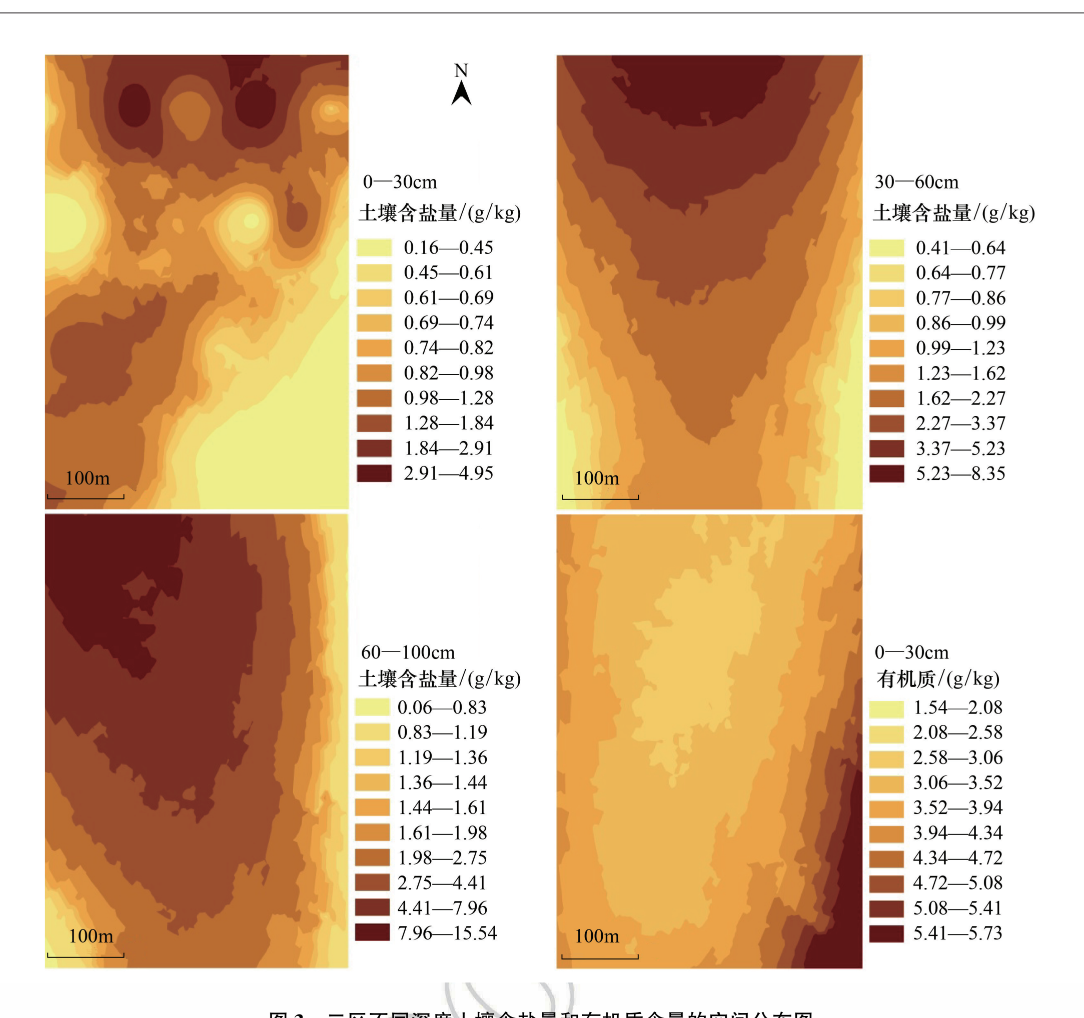


图 3 二区不同深度土壤含盐量和有机质含量的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of soil salinity and soil organic matter in different layers in area two

灌溉和大水漫灌后水分有往中部聚集的趋势,导致盐分也随之向中度集中。二区以中部北部地势较低,东南部地势较高,故土壤含盐量中北部明显高于东南部。土壤有机质两个区域分布具有一致性,与土壤盐分的空间分布状况相反,中部低而南北部较高,二者呈极显著负相关,这与谢承陶等[31]、杨奇勇等[18]的研究结果一致。复垦过程中由于施肥量较少,有机质的空间分布主要受复垦过程中土地平整不彻底,高低不平的微地形因素影响。整体来看,研究区土壤盐分含量较周边正常耕地高出 1—2g/kg,周边耕地的含盐量一般在 1—1.5 g/kg;研究区有机质含量低于周边正常耕地的有机质含量水平(约 0.5%—1.0%)。在后期的田块管理中需要增加灌溉次数,加大土壤盐分的淋洗强度,同时通过增施有机肥、深耕深松等措施提高土壤有机质含量。利用 Kriging 插值法绘制的土壤含盐量和有机质含量空间分布图,可准确和直观地了解两个区域中各层土壤盐分和有机质的空间分布状况,为本研究区乃至整个盐田复垦区盐渍化土地的分区、改良、管理和合理利用提供了一定的理论指导和参考依据。

5 结论

(1)两个区域虽然都进行了数年的复垦,但各层土壤盐分含量仍然很高,且随着深度的增加盐分含量逐渐升高,二区土壤含盐量明显低于一区;两个区域有机质含量普遍很低;两个区域各层土壤含盐量和有机质含量变异系数的变化范围在 10%—100%之间,在水平方向上均呈中等变异强度。

(2)土壤含盐量与有机质含量有着紧密的联系,二者呈现极显著的负相关关系,土壤盐分含量高的区域有机质含量低,二者之间在一定程度上满足指数关系。

(3)从空间自相关性来看,两个区域土壤含盐量和有机质含量的块基比变化范围在 12.24%—23.62%之间,均具有强的空间相关性,有机质含量的空间自相关明显高于土壤含盐量;从变程来看,两个区域土壤含盐量和有机质含量的变化范围均超过实际土壤采样间距,能反映出两个区域土壤含盐量和有机质含量的空间自相关关系。

(4)研究区土壤含盐量和表层有机质含量呈条带状分布。一区土壤含盐量以中部为高值区逐渐向南北部降低;二区土壤含盐量则以东南部最低,逐渐向西北部高值区过渡。一区土壤有机质含量表现为中部低南北部较高;二区则为东南部最高,中北部含量较低。

参考文献(References):

[1] 包海岩, 邵蓬, 张勤, 刘保中, 曹树香, 唐广刚. 北方地区盐田生态养殖技术. 河北渔业, 2012, (9): 13-17.

[2] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司. 潍坊废弃盐田、滩涂上的 3GW"光伏+"基地规划. (2015-05-20)[2017-05-09]. http://www.ne21.com/news/show-76524.html.

[3] 韩有松, 孟广兰, 王少青. 中国北方沿海第四纪地下卤水. 北京: 科学出版社, 1996: 14-15.

[4] 李道高, 赵明华, 韩美, 姜爱霞, 张祖陆. 莱州湾南岸平原浅埋古河道带研究. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1): 23-29.

[5] 高茂生, 郑懿珉, 刘森, 王松涛, 孔祥淮, 赵金明, 郭飞. 莱州湾地下卤水形成的古地理条件分析. 地质论评, 2015, 61(2): 393-400.

[6] Maas E V, Hoffman G J. Crop salt tolerance: current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1977, 103(2): 115-134.

[7] Amezketa E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. Journal of Arid Environments, 2006, 67(4): 594-606.

[8] Gorji T, Tanik A, Sertel E. Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 507-512.

[9] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 吕烨, 付小军. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210.

[10] Yao R J, Yang J S, Zhang T J, Gao P, Wang X P, Hong L Z, Wang M W. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. Geoderma, 2014, 232-234: 381-393.

[11] He B, Cai Y L, Ran W R, Zhao X L, Jiang H. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field. CATENA, 2015, 127: 129-134.

[12] Panagopoulos T. Jesus J, Antunes M D C, Beltrão J. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce. European Journal of Agronomy, 2006, 24(1): 1-10.

[13] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的指示克立格分析评价. 土壤学报, 2008, 45(4): 585-593.

[14] Yao R J, Yang J S, Wu D H, Xie W P, Cui S Y, Wang X P, Yu S P, Zhang X. Determining soil salinity and plant biomass response for a farmed coastal cropland using the electromagnetic induction method. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 119: 241-253.

[15] Liu G M, Li J B, Zhang X C, Wang X P, Lv Z Z, Yang J S, Shao H B, Yu S P. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for Eco-restoring the Yellow River Delta in combination with electromagnetic induction. Ecological Engineering, 2016, 94: 306-314.

[16] 岳耀杰, 张峰, 张国明, 张化, 徐品泓, 王静爱. 滨海盐碱地利用变化与优化研究——以黄骅市"台田-浅池"模式为例. 资源科学, 2010, 32(3): 423-430.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106-109.

[18] 杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏. 禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析. 生态学报, 2011, 31(8): 2196-2202.

[19] Michot D, Walter C, Adam I, Guéro Y. Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley. Geoderma, 2013, 207-208: 193-204.

[20] 侯景儒, 郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 309-314.

[21] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 35-45.

[22] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.

[23] Güler M, Arslan H, Cemek B, Erşahin S. Long-term changes in spatial variation of soil electrical conductivity and exchangeable sodium percentage in irrigated mesic ustifluvents. Agricultural Water Management, 2014, 135: 1-8.

[24] 刘文全, 于洪军, 徐兴永. 莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究. 土壤学报, 2014, 51(6): 1213-1222.

[25] Kravchenko A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1564-1571.

[26] 冷祥阳, 许士国, 许翼. 盐田填土造陆区盐渍化的调查与分析. 东北水利水电, 2015, (9): 19-21, 66-66.

[27] 闫靖华, 张凤华, 谭斌, 杨海昌. 不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响. 土壤学报, 2013, 50(6): 1183-1190.

[28] 赵富强, 侯颖, 杨雪, 张海琴, 周永红. 河南永城采煤塌陷复垦区不同复垦年限土壤理化性质的研究. 安徽农业科学, 2014, 42(23): 7863-7865.

[29] 武婕, 李玉环, 李增兵, 方正, 钟豫. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素. 生态学报, 2014, 34(6): 1596-1605.

[30] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.

[31] 谢承陶, 李志杰, 章友生, 林治安. 有机质与土壤盐分的相关作用及其原理. 土壤肥料, 1993, (1): 19-22.